



ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГЕТИКИ
И АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

INNOVATIVE SOLUTIONS IN ALTERNATIVE ENERGY AND ECOLOGY

ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГЕТИКИ
И АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

INNOVATIVE SOLUTIONS IN ALTERNATIVE
ENERGY AND ECOLOGY

Статья поступила в редакцию 09.01.24. Ред. Рег. № 319-001-24

The article has entered in publishing office 09.01.24. Ed. Reg. No. 319-001-24

УДК 621.311

**ПРОТИВОАВАРИЙНАЯ АВТОМАТИКА ДЛЯ СОЗДАНИЯ И
УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ЛОКАЛЬНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ
ЭНЕРГОСИСТЕМ НА БАЗЕ МАЛОЙ ГЕНЕРАЦИИ**

А. И. Марченко, А. Г. Фишов, И. С. Мурашкина*

Новосибирский государственный технический университет, факультет энергетики,
кафедра автоматизированных электроэнергетических систем
Проспект Карла Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

*Корреспондент автор: amarchenko91@yandex.ru; тел.: +7-953-766-62-73

doi: 10.15518/isjaee.2024.01.225-234

Заключение совета рецензентов: 18.01.24

Заключение совета экспертов: 22.01.24

Принято к публикации: 30.01.24

Актуальность работы заключается в исследованиях способов, средств, режимов и условий включения локальных систем электроснабжения с малой генерацией в состав сети внешней электроэнергетической системы (ЭЭС). При этом работа локальных систем электроснабжения в ЭЭС становится возможной только при внедрении новых подходов к управлению средствами автоматизированного режимного и противоаварийного управления при преодолении существующих технических барьеров на пути осуществления параллельной работы с ЭЭС.

В статье в общем описаны способ и техническое средство решения задачи надежного и эффективного энергоснабжения потребителей при развитии технологий малой распределенной генерации, при формировании на их базе локальных систем энергоснабжения (ЛСЭ). Предлагается малозатратная интеграция ЛСЭ в существующие электрические сети систем централизованного энергоснабжения с режимом параллельной работы генераторов в общей сети при управлении специальной противоаварийной и режимной автоматикой, качественное преобразование ЛСЭ в локальные интеллектуальные системы электроснабжения (ЛИСЭ, Minigrid).

Полноценное внедрение ЛИСЭ в существующую энергосистему для малой распределенной генерации является эволюционным этапом её развития, поскольку это позволит объектам малой энергетики работать не только в автономном режиме, но и в составе региональной централизованной электроэнергетической системы, благодаря чему у них появляются дополнительные технические эффекты, прежде всего по обеспечению надежности электроснабжения потребителей.

Ключевые слова: локальные системы электроснабжения, интеллектуальные энергосистемы, электрические сети, синхронная генерация, гибридная генерация, распределенная малая генерация, моделирование, режим, автоматика, управление.

А. И. Марченко, А. Г. Фишов, И. С. Мурашкина. Противоаварийная автоматика для создания и управления режимами локальных интеллектуальных энергосистем на базе малой генерации // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 01 (418) 2024, с. 225-234

A. I. Marchenko, A. G. Fishov, I. S. Murashkina. Emergency automation for creating and controlling modes of local smart power systems based on small-scale generation // Alternative Energy and Ecology (ISJAEE), 01(418) 2024, pp. 225-234



EMERGENCY AUTOMATION FOR CREATING AND CONTROLLING MODES OF LOCAL SMART POWER SYSTEMS BASED ON SMALL-SCALE GENERATION

A. I. Marchenko, A. G. Fishov, I. S. Murashkina*

Novosibirsk State Technical University, Faculty of Energy,
Department of Automated Electric Power Systems
Karl Marx Avenue, 20, Novosibirsk, 630073, Russia

* Correspondent author: amarchenko91@yandex.ru; tel.: +7-953-766-62-73

doi: 10.15518/isjaee.2024.01.225-234

Referred: 18.01.24

Received in revised form: 22.01.24

Accepted: 30.01.24

The relevance of the study lies in the research of methods, means, modes and conditions for the inclusion of local power supply systems with small-scale generation in the network of an external electric power system (EPS). At the same time, the operation of local power supply systems in EPS becomes possible only with the implementation of new approaches to controlling automated mode and emergency control means while overcoming existing technical barriers to parallel operation with EPS.

The article generally describes a method and technical means for solving the problem of reliable and efficient energy supply to consumers during the development of small-scale distributed generation technologies and the formation of local power supply systems (LPS) on its basis. The low-cost integration of LPSs into existing electrical networks of centralized power supply systems with a mode of parallel operation of generators in a common network while controlling special emergency and mode automation and high-quality transformation of LPSs into local smart power supply systems (LSPS, Minigrid) are proposed.

The full implementation of LSPS into the existing power system for small-scale distributed generation is an evolutionary stage in its development, since this will allow small power facilities to operate not only in an autonomous mode, but also as part of a regional centralized power system. Due to which LSPSs have additional technical effects, primarily in terms of ensuring the reliability of power supply to consumers.

Keywords: local power supply systems, smart power systems, electrical networks, synchronous generation, hybrid generation, distributed small generation, modeling, mode, automation, control.

Сведения об авторе:

кандидат технических наук, заведующий сектором отдела подготовки кадров высшей квалификации, старший преподаватель кафедры автоматизированных электроэнергетических систем, заведующий и старший научный сотрудник лаборатории интеллектуальных электроэнергетических систем, факультет энергетики, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия.

Образование: Магистр по направлению «Электроэнергетика и электротехника», Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия.

Область научных интересов: Моделирование и исследование режимов электроэнергетических систем, как на цифровых моделях, так и на физической электродинамической. Исследование и разработка способов и средств управления режимами электрических сетей с распределенной малой генерации, устройств автоматики для создания и управления режимами локальных интеллектуальных энергосистем.

Публикации: более 40 публикаций.
Elibrary AuthorId: 1067080
Scopus Author ID: 57194551064
WoS Author ID: O-9623-2017
ORCID: 0000-0002-8721-556X

Author information:

Candidate of Technical Sciences, Sector Head of the Department of Highly qualified personnel training, Senior Lecturer of the Automated electric power systems Department, Head and Senior Researcher of the Smart electrical power systems Laboratory, Faculty of Power Engineering, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Education: Master of «Electric engineering and electrical technology», Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Research area:

Modeling and research of modes of electric power systems, both on digital models and on a real physical electrodynamic model. Research and development of methods and means for controlling the modes of electric networks with distributed small-scale generation, development of automatic control devices for creating and controlling the modes of local smart power systems.

Publications: more than 40 publications.

Elibrary AuthorId: 1067080
Scopus Author ID: 57194551064
WoS Author ID: O-9623-2017
ORCID: 0000-0002-8721-556X



Марченко
Андрей Иванович

Marchenko Andrey
Ivanovich



Фишов
Александр Георгиевич

Fishov
Alexander Georgievich

Сведения об авторе:

доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных электроэнергетических систем, факультет энергетики, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия.

Образование:

Инженер по специальности «Электрические сети и системы», Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия.

Область научных интересов:

Управление режимами работы электроэнергетических систем и электрических сетей. Разработка новых технологий управления энергосистемами на основе децентрализованного мультиагентного управления. Объекты с малой распределенной генерацией, исследование, разработка и создание комплексных автоматик управления.

Публикации: более 200 публикаций.

Elibrary AuthorID: 462203
Scopus Author ID: 6506654464

Author information:

Doctor of Technical Science, Professor of the Automated electric power systems Department, Faculty of Power Engineering, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Education:

Engineer with a degree in Electrical Networks and Systems, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Research area:

Control of operating modes of electrical power systems and electrical networks. Development of new technologies for controlling energy systems based on decentralized multi-agent control. Facilities with small-scale distributed generation, research, development and creation of complex control automation.

Publications: more than 200 publications.

Elibrary AuthorID: 462203
Scopus Author ID: 6506654464

Сведения об авторе:

Ассистент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем, младший научный сотрудник лаборатории интеллектуальных электроэнергетических систем, факультет энергетики, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия.

Образование:

Магистр по направлению «Электроэнергетика и электротехника», Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия.

Область научных интересов:

Исследование электроэнергетических систем с гибридной и электронной генерацией. Математическое и физическое моделирование режимов электроэнергетических систем с распределенной малой генерацией.

Публикации: более 16 публикаций.

Elibrary AuthorID: 1146016
Scopus Author ID: 57205475019

Author information:

Assistant of the Automated electric power systems Department, Junior Researcher of the Intelligent electrical power systems Laboratory, Faculty of Power Engineering, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Education:

Master of «Electric engineering and electrical technology», Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Research area:

Research of electric power systems with hybrid and electronic generation. Mathematical and physical modeling of the electric power system modes with distributed small-scale generation.

Publications: more than 16 publications.

Elibrary AuthorID: 462203
Scopus Author ID: 6506654464



Мурашкина
Инна Сергеевна

Murashkina
Inna Sergeevna



Таблица основных сокращений:

РМГ	распределенная малая генерация
ЭЭС	электроэнергетическая система
ЛЭСЭ	локальная система электроснабжения
КЗ	короткое замыкание
ЛИСЭ	локальная интеллектуальная система электроснабжения
РА	режимная автоматика
ПА	противоаварийная автоматика
РП, РУ	распределительный пункт, распределительное устройство
ТЭС	тепловая электрическая станция

1. Введение

В России с её климатическими и географическими особенностями в сфере энергетики исторически возводились объекты, преимущественно развивались технологии когенерационных энергоустановок на базе топливной углеродной генерации. В настоящее время происходит трансформация энергетического сектора – появление новых технологий производства электроэнергии на установках с распределенной малой генерацией (РМГ).

Одним из мировых трендов, являющимся также наиболее актуальным для России, является развитие распределенной малой генерации использующей технологии синхронной малой когенерации и создание

на базе её локальных электроэнергетических систем (в иностранном понимании и обозначении – Minigrid) [1-9].

Электроэнергетическая система (ЭЭС) со значительной долей источников РМГ требует: повышения уровня интеграции между различными её элементами, наличия распределенной архитектуры с локальным управлением, комбинированной с централизованным управлением, а также новых способов управления, как для установившихся режимов, так и для аварийных с переходными процессами в элементах ЭЭС [10-15].

2. Локальные системы электроснабжения на базе малой генерации

Под Microgrid понимается локальная группа источников электроэнергии нагрузок, которая обычно работает подключенной к традиционной синхронной сети, но может также отключаться с переходом в «островной режим» и работать автономно. В России дополнительно различают Microgrid (распределенная генерация мощностью до 1000 кВт) и Minigrid.

Minigrid – локальная сбалансированная система энергоснабжения потребителей с одной многоагрегатной электростанцией или распределенной генерацией суммарной мощностью до 25 МВт с различными видами используемых первичных энергоресурсов (преимущественно топливной с синхронными генераторами), работающая в островном режиме (автономно, на собственную нагрузку) или параллельно с внешней энергосистемой (на выдачу мощности в сеть, в режиме нулевого перетока и на потребление из сети) [16-20].

При необходимости интеграции отдельной электростанции, как источника собственной генерации, в централизованную энергосистему она оборудуется существующими известными устройствами автоматки [21-23]. Так, имеющаяся в настоящее время автоматика обеспечения безопасной работы энергоблоков, например, голландской фирмы «Terberg» [24], использует способ запрета параллельной работы или

отключение и останов энергоблоков при всех аварийных возмущениях, что снижает надежность электроснабжения потребителей и работы электростанции из-за частых отключений.

Достоинства при параллельной работе локальной системы электроснабжения (ЛЭСЭ) в составе общей электрической сети мощной ЭЭС очевидны, но остаются риски и барьеры технического характера. Это, прежде всего, плохая электромеханическая совместимость данных систем – инерционность энергоблоков большой энергетики и генераторов малой электростанции в значительной степени отличаются. Вследствие чего и возникают при обычном включении ЛЭСЭ с малой генерации в мощную ЭЭС большой централизованной энергетики опасные асинхронные режимы, и в данных условиях не обеспечивается динамическая устойчивость параллельной работы данных систем, что приводит к выходу из строя установок малой генерации со своими синхронными генераторами, возникают динамические моменты на валах машин в момент проходящего короткого замыкания (КЗ) или после отключения КЗ существующими релейными защитами сети. При подключении локальных систем электроснабжения с малой генерацией происходит увеличение токов КЗ, причем на подстанции присоединения системы к сети ЭЭС не сильно



значительно, а в самой ЛСЭ многократно, порядка 4-х кратных значений. Требуется настройка согласованности работы релейной защиты основной сети, что очень затратно и труднообеспечимо. Следует, что в совокупности все указанные особенности на пути осуществления присоединения на параллельную работу ЛСЭ с малой генерацией с внешней сетью ЭЭС

являются технологическими барьерами для взаимной интеграции. Разработка мер по решению указанных проблем является важной задачей. Необходимо комплексно решить техническую задачу прямого включения и безопасной работы объектов с синхронной малой генерацией в составе ЛСЭ в электрические сети посредством синхронных связей.

3. Противоаварийное управление режимом работы локальной системы электроснабжения и техническая реализация автоматики опережающего сбалансированного деления

Идея разработки заключается в том, что вместо применения дорогостоящих силовых установок для решения проблемы безопасной интеграции ЛСЭ в существующие сети предлагается комплекс технических решений и специализированная системная автоматика, использующая оригинальные (запатентованные) способы взаимодействующих противоаварийного, режимного управления и автооперирования генерацией ЛЭС, ее схемой выдачи мощности, восстановлением нормальных режимов [25].

Способом противоаварийного управления в режиме синхронной работы ЛСЭ с внешней электрической сетью является ее экстренное, сбалансированное по мощности, отделение от внешней электрической сети ЭЭС при возмущениях, угрожающих нарушению устойчивости параллельной работы электростанции ЛСЭ с внешней электрической сетью или возник-

новению опасных динамических моментов на валах генераторов, с сохранением в работе электростанции и электроснабжения потребителей ЛСЭ после отделения [26-27].

Научным коллективом кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета, под научным руководством и соавтором разработки профессором А. Г. Фишовым, совместно с компаниями-партнерами (ООО «Модульные системы Торнадо» и АО «Институт автоматизации энергетических систем», г. Новосибирск) была выполнена техническая реализация автоматики управления для создания локальных интеллектуальных систем электроснабжения (ЛИСЭ) [28].

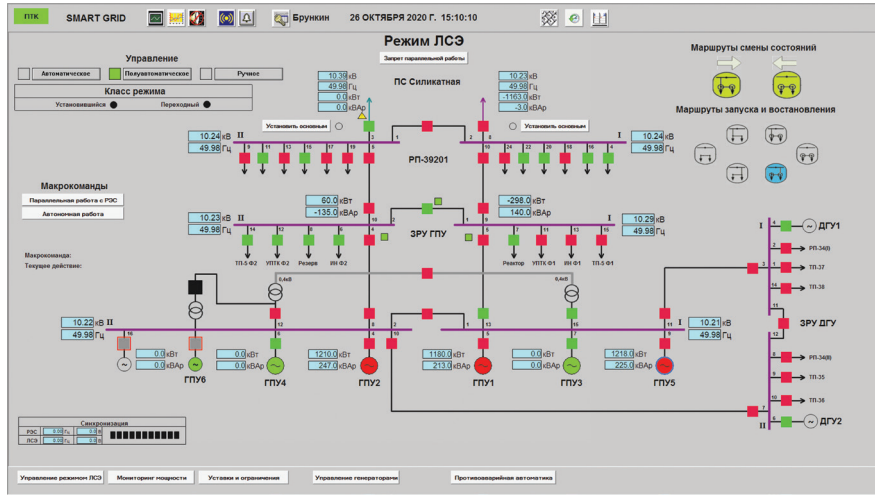
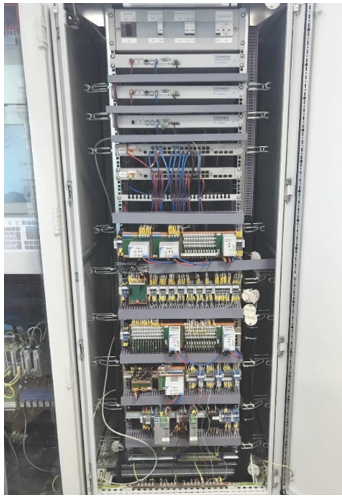
На рисунке 1 представлена функциональная структура системной автоматики управления ЛИСЭ



Рис. 1. Функциональная структура автоматики
Fig. 1. Functional structure of automation

Общий вид опытного образца автоматики показан на рисунке 2а. На рисунке 2б представлена опера-

тивная схема ЛИСЭ, контролируемая диспетчером и автоматикой ЛИСЭ.



а)

б)

Рисунок 2 – а) Общий вид автоматики управления ЛИСЭ,

б) Оперативная схема ЛИСЭ (видеокадр программно-технического комплекса)

Fig. 2. a) General view of the Minigrid control automation,

б) Minigrid operational diagram (video frame of the software and hardware complex)

Подсистема противоаварийной автоматики является составной частью осуществленной разработки специализированной системы автоматики комплексного управления режимами ЛИСЭ, имеющей в своем составе подсистемы противоаварийного режимного управления и автооперирования режимами ЛИСЭ, обеспечивающей требуемые системные свойства, в том числе возможности полноценной работы, как в параллельном с внешней энергосистемой, так и автономном режимах с безопасными переходами между ними.

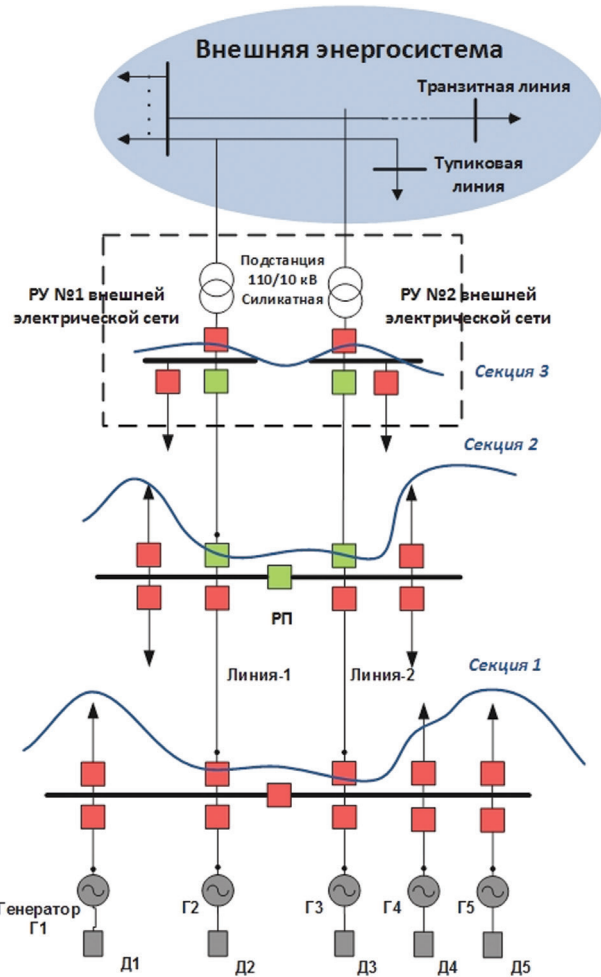
4. Результаты проведенных исследований и внедрения противоаварийной автоматики

Реальным объектом исследования являлась созданная на базе локальной системы энергоснабжения с когенерационной тепловой электрической станцией (электрическая и тепловая энергии) ЛИСЭ (MiniGrid) в городе Новосибирске, осуществляющая электро- и теплоснабжение жилого массива и промышленных предприятий в прилегающем к теплоэлектростанции районе.

ЛИСЭ включает в себя 5 энергоблоков с газопоршневыми установками мощностью по 1,8 МВт каждый. Объединение установок выполнено в распределительном устройстве на напряжении 10 кВ. Электропотребление в сети ЛИСЭ составляет порядка 5 МВт, из них 3 МВт это коммунально-бытовая нагрузка и 2,4 МВт промышленная (в основном двигательная нагрузка). Таким образом, на электростанции имеется

Рис. 3. Схема ЛИСЭ с электростанцией малой генерации при ее подключении к внешней электрической сети энергосистемы большой мощности

Fig. 3. Minigrid diagram with a small-generation power plant when connected to the external electrical network of a high-power power system



резерв мощности в 3,6 МВт, которую можно выдать в общую электрическую сеть внешней энергосистемы при осуществлении режима параллельной, синхронной работы с ней.

Схема выдачи мощности ЛСЭ внешней электрической сети энергосистемы представлена на рисунке 3.

Управление режимом генерации ЛИСЭ осуществляется режимной автоматикой (РА) для поддержания условий сбалансированного отделения ЛИСЭ от ЭЭС, при этом действие противоаварийной автоматики (ПА) осуществляется на выключателях сечений для деления.

Посредством автоматики по назначенным сечениям осуществляется сбалансированное отделение ЛИСЭ при технологических нарушениях во внешней сети и последующее восстановление её синхронной параллельной с электрической сетью.

Срабатывание пускового органа подсистемы противоаварийного управления ЛИСЭ происходит за время, менее 20 мс, и определяется уставками по напряжению прямой и обратной последовательностей напряжения в контрольном узле сети (например, на шинах распределительного устройства (РУ) подстанции присоединения с выключателями, используемыми для деления).

Проведенные исследования и полученные дина-

мические характеристики в целом показывают возможность осуществления безопасного синхронного режима, как для ЛИСЭ, так и для внешней сети энергосистемы, и позволяют по специальной разработанной методике определить необходимые уставки срабатывания пусковых органов автоматики управления ЛИСЭ [29-30].

Недопустимым и разрушающим оборудование режимом энергоблоков ЛИСЭ с внешней сетью энергосистемы большой мощности является режим без её отделения от внешней электрической сети энергосистемы при всех 1-2-3-х фазных КЗ области прилегающей сети 110-220 кВ. При несбалансированном отделении ЛИСЭ от внешней сети энергосистемы при внешнем КЗ, динамические характеристики режима являются недопустимыми для генераторов электростанции ЛИСЭ, вследствие чего происходит их автоматическое отключение собственными защитами энергоблоков. Эффективность автоматического экстренного отделения ЛИСЭ от внешней сети доказана, как при стендовых испытаниях (на физической модели ЛИСЭ), так и при опытной и промышленной эксплуатации. По расчетным исследованиям также были определены зоны возмущений во внешней сети, короткие замыкания в которых приводят к срабатыванию автоматики на противоаварийное сбалансированное отделение ЛИСЭ.

Заключение

В статье описаны способы и средства решения проблемы надежного и экономически эффективного энергоснабжения потребителей в локальных системах энергоснабжения с собственными источниками электроэнергии путем их малозатратной интеграции в существующие электрические сети систем централизованного энергоснабжения с режимом параллельной работы генераторов в общей сети.

Предложенные технические решения внедрены в разработанной специализированной интеллектуальной системной автоматике для создания на базе ЛСЭ локальных интеллектуальных энергосистем (ЛИСЭ, MiniGrid), использующих инновационные способы управления при автономной и параллельной с внешней сетью работе ЛИСЭ, а также при переходах между ними.

Получен опыт практического применения предложенных решений и разработанной системной автоматики при реализации пилотного проекта создания ЛИСЭ в городе Новосибирске на базе автономной локальной системы энергоснабжения газовой Мини-ТЭС, обеспечивающей энергоснабжение жилого массива. Автоматика с подсистемой противоаварий-

ного управления использована при создании ЛИСЭ (MiniGrid энергоснабжения электричеством, теплом и горячей водой) крупного жилого массива «Березовое» (с численностью населения порядка 10 тыс. чел.) в городе Новосибирске, введена в опытную и в настоящее время переведена в промышленную эксплуатацию.

Достигнутый эффект от внедрения состоит в кратном снижении затрат на интеграцию ЛСЭ в сети централизованного энергоснабжения, сокращении сроков окупаемости объектов с малой генераций в существующие электрические сети, также эффект от реализации проекта выражен в повышении доступности энергоснабжения для потребителей, его надежности, инвестиционной привлекательности развития распределенной энергетики, живучести систем энергоснабжения в целом.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10186 и гранта № р-56 Правительства Новосибирской области в Новосибирском государственном техническом университете.



Список литературы

- [1]. Мелентьев Л. А. Очерки истории отечественной энергетики. – М.: Наука, 1987. – 278 с.
- [2]. Капица С. П., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г. Синергетика и прогнозы будущего. – М.: УРСС, 2003. – 288 с.
- [3]. N. Voropai. Electric Power System Transformations: A Review of Main Prospects and Challenges, *Energie*, 13, no. 21, 5639 (2020)
- [4]. C. Marnay, C. Abbey, G. Joos, *Microgrids 1: Engineering, economics, and experience – Capabilities, benefits, business opportunities and examples – Microgrids evolution roadmap*. *Electra*, 283, 71–75 (2015)
- [5]. Некрасов С. А. Вопросы формирования альтернативной концепции развития электроэнергетики. Часть 1. От роста мощности энергосистемы к повышению структурной устойчивости электроэнергетики [Текст]: монография. – М.: ЦЭМИ РАН, 2020. – 180 с.
- [6]. Некрасов С. А. Вопросы формирования альтернативной концепции развития электроэнергетики. Часть 2. Пути трансформации энергоснабжения [Текст]: монография. – М.: ЦЭМИ РАН, 2020. – 283 с.
- [7]. *Microgrids: Architectures and Control*; Hatzigiorgiou, N. (Ed.) IEEE Press-Wiley: New York, NY, USA (2014)
- [8]. Yu. N. Kuchеров, D. N. Yarosh, Yu. G. Fedorov, A. Oudalov. Analysis of technical aspects of smart grid technologies integration into power system of megacity, Proc. CIGRE International Symposium «The electric power system of the future – Integrating supergrids and microgrids», Bologna, Italy (September 13–15, 2011)
- [9]. P. V. Ilyushin, Yu. G. Fedorov, S. P. Filippov, Yu. N. Kuchеров, S. A. Nekrasov, F. V. Veselov, D. N. Yarosh, Yu. A. Zeygarnik, A. Z. Zhuk. Features of small dispersed CHP integration into the power system, Proc. of 45th International Conference on Large High Voltage Electric Systems, CIGRE Session 45, Paris, France, 1–10 (August 24 – 29, 2014)
- [10]. Н. В. Кваша. Распределенная и цифровая энергетика как инновационные элементы четвертого энергоперехода / Н. В. Кваша, Е. Г. Бондарь // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2021, Том 14, № 6. – С. 67–77.
- [11]. Control for Grid-Connected and Intentional Islanding Operations of Distributed Power Generation / I. J. Balaguer, Q. Lei, S. Yang [et al.] // *IEEE Trans. Ind. Electron.* – 2011. – Vol. 58, iss. 1. – P. 147–157.
- [12]. Ashabani, S. M. New Family of Microgrid Control and Management Strategies in Smart Distribution Grids – Analysis, Comparison and Testing / S.M. Ashabani, Y. A. I. Mohamed // *IEEE Trans. Power Syst.* – 2014. – Vol. 29, iss. 5. – P. 2257–2269.
- [13]. Воропай, Н. И., Проблемы уязвимости и живучести кибер-физических электроэнергетических систем / Н. И. Воропай, И. Н. Колосок., Е. С. Коркина, А. Б. Осак // *Энергетическая политика*. – 2018. – № 5. – С. 53–61.
- [14]. Булатов, Ю. Н. Мультиагентные технологии управления в системах электроснабжения с активными потребителями / Ю. Н. Булатов, А. В. Крюков // *Труды Братского государственного университета. Серия Естественные и инженерные науки*. – 2016. – № 2. – С. 145–154.
- [15]. Мультиагентное оптимальное управление электрическими сетями с активными потребителями и возобновляемыми источниками энергии / В. В. Молодюк, Я. Ш. Исамухамедов, П. В. Илюшин, Д. А. Ивановский // *Энергетик*. – 2022. – № 2. – С. 45–52.
- [16]. Фишов, А. Г. Активные распределительные электрические сети с децентрализованным мультиагентным управлением режимом / А. Г. Фишов, А. А. Осинцев, Ю. В. Какоша, М. З. Одинабеков // *«ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»* № 10 (2022): Выпуск № 10. – 2022.
- [17]. Илюшин, П. В. Системный подход к развитию и внедрению распределённой энергетики и возобновляемых источников энергии в России / П. В. Илюшин // *Энергетик*. – 2022. – № 4. – С. 20–27.
- [18]. Zhou, X. An overview on microgrid technology / X. Zhou, T. Guo, Y. Ma // 2015 160 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA): proc., Beijing, 02-05 August 2015. – Beijing: IEEE, 2015. – P. 76–81.
- [19]. Real-World MicroGrids-An Overview / M. Barnes, J. Kondoh, H. Asano [et al.] // 2007 IEEE International Conference on System of Systems Engineering: proc., San Antonio, 16-18 April 2007. – San Antonio: IEEE, 2007. – P. 1–8.
- [20]. Zaidi, A. A. Microgrid automation - a self-configuring approach / A. A. Zaidi, F. Kupzog // 2008 IEEE International Multitopic Conference: proc., Karachi, 23-24 December 2008. – Karachi: IEEE, 2008. – P. 565–570.
- [21]. Автоматика энергосистем: учебное пособие / составители Ю. С. Боровиков, А. С. Гусев, М. В. Андреев, А. О. Сулайманов; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 196 с.
- [22]. Овчаренко Н. И., Автоматика энергосистем: учебник для вузов / Н. И. Овчаренко; под ред. чл.-корр. РАН, докт. техн. наук, проф. А. Ф. Дьякова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2016.
- [23]. A. L. Kulikov, M. V. Sharygin, P. V. Ilyushin. Principles of organization of relay protection in microgrids with distributed power generation sources, *Power Technology and Engineering*, 53, no. 5, 611–617 (2020)
- [24]. Электронный ресурс: <https://www.terbergspecialvehicles.com>
- [25]. Технические и экономические аспекты со-

здания минигридов и их интеграции с централизованным энергоснабжением. Фишов А. Г. / Энергетик. 2022. № 4. С. 27-34. – <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2022.85.14.005>

[26]. Способ противоаварийного управления режимом параллельной работы синхронных генераторов в электрических сетях. Фишов А. Г., Марченко А. И., Мукатов Б. Б. / Патент на изобретение RU 2662728 C2, 30.07.2018.

[27]. Средства и способы управления параллельной работой электрической станции малой генерации с электрической сетью / А. И. Марченко, В. В. Денисов, И. С. Мурашкина // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2019. – Вып. № 1 (74). – С. 77–90. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-77-90.

[28]. Decentralized emergency control of AC power grid modes with distributed generation / A. Fishov, A. Osintsev, A. Ghulomzoda, A. Marchenko, Kokin, S., Safaraliev, M., Dmitriev, S. & Zicmane, I. –

DOI 10.3390/en16155607. – Text : direct // Energies. – 2023. – Vol. 16, iss. 15. – Art. 5607.

[29]. Исследование устойчивости параллельной работы локальной системы энергоснабжения малой мощности с внешней электрической сетью энергосистемы / А. Г. Фишов, А. И. Марченко, В. В. Денисов, И. С. Мурашкина // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2020. – № 1. – С. 116–127. – DOI: 10.31857/S0002331020010136

[30]. Dynamic Characteristics of the Minigrd Synchronous Operation with the Electrical Network of a Centralized Electric Power System / A. I. Marchenko, I. S. Murashkina. – DOI: 10.1109/EDM55285.2022.9855051. – Text: direct // IEEE 23 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM) to the 100th anniversary of the legendary NETI rector Georgy Lyshchinsky: proc., Erlagol, 30 June – 4 July 2022. – Novosibirsk: IEEE, 2022. – P. 455-460.

Referenses

[1]. Melentyev L. A. Essays on the history of domestic energy. M.: Nauka, 1987. – 278 p. (Rus.)

[2]. Kapitsa S.P., Kurdyumov S.P., Malinetsky G.G. Synergetics and future forecasts. M.: URSS, 2003. – 288 p. (Rus.)

[3]. N. Voropai. Electric Power System Transformations: A Review of Main Prospects and Challenges, *Energie*, 13, no. 21, 5639 (2020)

[4]. C. Marnay, C. Abbey, G. Joos, Microgrids 1: Engineering, economics, and experience – Capabilities, benefits, business opportunities and examples – Microgrids evolution roadmap. *Electra*, 283, 71-75 (2015)

[5]. Microgrids: Architectures and Control; Hatzigiorgiou, N. (Ed.) IEEE Press-Wiley: New York, NY, USA (2014)

[6]. Nekrasov S. A. Issues of establishing an alternative concept of energy development. Part 1. From an increase in the capacity of the power system to an increase in the structural stability of the electric power industry. – Moscow: CEMI Russian Academy of Sciences, 2020. – 180 p. (Rus.)

[7]. Nekrasov S. A. Issues of establishing an alternative concept of energy development. Part 2. Ways to transform energy supply. – Moscow: CEMI Russian Academy of Sciences, 2020. – 283 p. (Rus.)

[8]. Yu. N. Kucherov, D. N. Yarosh, Yu. G. Fedorov, A. Oudalov. Analysis of technical aspects of smart grid technologies integration into power system of megacity, Proc. CIGRE International Symposium «The electric power system of the future – Integrating supergrids and microgrids», Bologna, Italy (September 13-15, 2011)

[9]. P. V. Ilyushin, Yu. G. Fedorov, S. P. Filippov, Yu. N. Kucherov, S. A. Nekrasov, F. V. Veselov, D. N. Yarosh, Yu. A. Zeygarnik, A. Z. Zhuk. Features of

small dispersed CHP integration into the power system, Proc. of 45th International Conference on Large High Voltage Electric Systems, CIGRE Session 45, Paris, France, 1-10 (August 24-29, 2014)

[10]. N. V. Kvasha. Distributed and digital energy as innovative elements of the fourth energy transition / N. V. Kvasha, E. G. Bondar // Scientific and technical bulletins of St. Petersburg State Polytechnic University. Economic Sciences. 2021, Vol. 14, No. 6. – P. 67–77. (Rus.)

[11]. Control for Grid-Connected and Intentional Islanding Operations of Distributed Power Generation / I. J. Balaguer, Q. Lei, S. Yang [et al.] // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2011. – Vol. 58, iss. 1. – P. 147–157.

[12]. Ashabani, S. M. New Family of Microgrid Control and Management Strategies in Smart Distribution Grids – Analysis, Comparison and Testing / S. M. Ashabani, Y. A. I. Mohamed // IEEE Trans. Power Syst. – 2014. – Vol. 29, iss. 5. – P. 2257–2269.

[13]. Voropai, N. I., Problems of vulnerability and survivability of cyber-physical electrical power systems / N. I. Voropai, I. N. Kolosok., E. S. Korkina, A. B. Osak // Energy Policy. – 2018. – No. 5. – P. 53–61. (Rus.)

[14]. Bulatov, Yu. N. Multi-agent control technologies in power supply systems with active consumers / Yu. N. Bulatov, A. V. Kryukov // Proceedings of Bratsk State University. Series Natural and engineering sciences. – 2016. – No. 2. – P. 145–154. (Rus.)

[15]. Multi-agent optimal control of electrical networks with active consumers and renewable energy sources / V. V. Molodyuk, Ya. Sh. Isamukhamedov, P. V. Ilyushin, D. A. Ivanovsky // *Energetik*. – 2022. – No. 2. – P. 45–52. (Rus.)

[16]. Fishov, A. G. Active distribution electrical



networks with decentralized multi-agent mode control / A. G. Fishov, A. A. Osintsev, Yu. V. Kakosha, M. Z. Odinabekov // «ELECTRICITY» No. 10 (2022): Issue No. 10. – 2022. (Rus.)

[17]. Ilyushin, P. V. Systematic approach to the development and implementation of distributed energy and renewable energy sources in Russia / P. V. Ilyushin // *Energetik.* – 2022. – No. 4. – P. 20–27. (Rus.)

[18]. Zhou, X. An overview on microgrid technology / X. Zhou, T. Guo, Y. Ma // 2015 160 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA): proc., Beijing, 02-05 August 2015. – Beijing: IEEE, 2015. – P. 76–81.

[19]. Real-World MicroGrids-An Overview / M. Barnes, J. Kondoh, H. Asano [et al.] // 2007 IEEE International Conference on System of Systems Engineering: proc., San Antonio, 16-18 April 2007. – San Antonio: IEEE, 2007. – P. 1–8.

[20]. Zaidi, A. A. Microgrid automation – a self-configuring approach / A. A. Zaidi, F. Kupzog // 2008 IEEE International Multitopic Conference: proc., Karachi, 23-24 December 2008. – Karachi: IEEE, 2008. – P. 565–570.

[21]. Automation of power systems: textbook / compiled by Yu. S. Borovikov, A. S. Gusev, M. V. Andreev, A. O. Sulaimanov; Tomsk Polytechnic University. – Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2015. – 196 p.

[22]. Ovcharenko N. I., Automation of power systems: textbook for universities / N. I. Ovcharenko; edited by member-corr. RAS, Dr. tech. sciences, prof. A. F. Dyakova. – M.: MPEI Publishing House, 2016.

[23]. A. L. Kulikov, M. V. Sharygin, P. V. Ilyushin. Principles of organization of relay protection in microgrids with distributed power generation sources, *Power Technology and Engineering*, 53, no. 5, 611-617 (2020)

[24]. Electronic resource: <https://www.terbergspecialvehicles.com>

[terbergspecialvehicles.com](https://www.terbergspecialvehicles.com)

[25]. Technical and economic aspects of creating minigrids and its integration with centralized energy supply. Fishov A. G. / *Energetik.* 2022. No. 4. pp. 27-34. – <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2022.85.14.005>

[26]. Method of emergency control of the parallel operation mode of synchronous generators in electrical networks. Fishov A. G., Marchenko A. I., Mukatov B. B. / Patent for invention RU 2662728 C2, 07/30/2018.

[27]. Means and methods for controlling the parallel operation of a small-generation power station with an electrical network / A. I. Marchenko, V. V. Denisov, I. S. Murashkina // *Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University.* – 2019. – Issue. No. 1 (74). – P. 77-90. – DOI: 10.17212/1814-1196-2019-1-77-90.

[28]. Decentralized emergency control of AC power grid modes with distributed generation / A. Fishov, A. Osintsev, A. Ghulomzoda, A. Marchenko, Kokin, S., Safaraliev, M., Dmitriev, S. & Zicmane, I. – DOI 10.3390/en16155607. – Text : direct // *Energies.* – 2023. – Vol. 16, iss. 15. – Art. 5607.

[29]. Study of the stability of parallel operation of a local low-power power supply system with an external electrical network of the power system / A. G. Fishov, A. I. Marchenko, V. V. Denisov, I. S. Murashkina // *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy.* – 2020. – No. 1. – P. 116-127. – DOI: 10.31857/S0002331020010136

[30]. Dynamic Characteristics of the Minigrid Synchronous Operation with the Electrical Network of a Centralized Electric Power System / A. I. Marchenko, I. S. Murashkina. – DOI: 10.1109/EDM55285.2022.9855051. – Text: direct // IEEE 23 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM) to the 100th anniversary of the legendary NETI rector Georgy Lyshchinsky: proc., Erlagol, 30 June – 4 July 2022. – Novosibirsk: IEEE, 2022. – P. 455-460.

Транслитерация по BSI

